

О. С. Левинський, М. О. Голофєєва, к.т.н., В. О. Шворінь, С. М. Урсол

Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ОБ'ЄКТА ПРИЛАДАМИ ІНФРАЧЕРВОНОЇ ТЕХНІКИ

Розглянуто питання вимірювання температури за допомогою приладів інфрачервоної техніки. Вкрай актуальним питанням є дистанційне вимірювання дійсного значення температури при невідомій випромінювальній здатності тіла, що досліджується. Проведено аналіз факторів, що впливають на точність вимірювання температури. Представлено дослідження впливу кута спостереження на коефіцієнт випромінювальної здатності.

Ключові слова: температура, коефіцієнт випромінювальної здатності, похибка вимірювання, тепловізійний контроль, інфрачервона техніка.

Вступ

Як відомо, у базових галузях промисловості України (металургії, хімічній провислості, промисловості будівельних матеріалів та машинобудуванні) широко використовуються енергоємні високотемпературні процеси: плавка металів, обробка поверхні металевих деталей та інші. Такі технологічні процеси потребують ретельного дотримання рекомендованих температурних режимів, оскільки регулювання температурного режиму – найбільш важливий і універсальний засіб збільшення швидкості процесу і підвищення виходу готового продукту. Більшість високотемпературних процесів протікають при температурах більше 900°C [1]. Проте, є такі процеси, які протікають при значно нижчих температурах (250 ... 500°C), але їх відносять до високотемпературних, оскільки температура є головним фактором інтенсифікації цих процесів для одержання максимального виходу готового продукту з високими техніко-економічними показниками. Тому існує постійний попит на пристрої та методи для безконтактного вимірювання як високих так і відносно низьких температур.

Безконтактність і швидкодія контролю температури приладами, що реєструють випромінювання в інфрачервоному і світловому діапазонах, висока роздільна здатність, що забезпечує виявлення локальних і тимчасових різниць температур на об'єктах контролю, можливості візуалізації теплових полів, є основними перевагами цих приладів в тепловому контролі [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сфера застосування приладів інфрачервоної техніки безперервно розширюється, тому є необхідність підвищувати вимоги до більш точного вимірювання температури. Точне визначення фізичної температури об'єкта по його тепловому ІЧ випромінюванню залежить від багатьох факторів, головним чином недостатньою кількістю

інформації коефіцієнту випромінювання поверхні досліджуваного об'єкта.

Вимірювання дійсного значення температури при невідомій випромінювальній здатності являється актуальним, оскільки проводяться вже не одне десятиліття, і не дивлячись на деякий прогрес і успіх в даному напрямленні, задачі, при яких використовується обмежений об'єм інформації про коефіцієнт випромінювальної здатності, залишаються не вирішеними. В даному напрямленні активні роботи та дослідження ведуться як на Україні, так і за кордоном

Зокрема, в роботах [1 – 3] відзначено проблемами та фактори, що виникають при дистанційному визначенні температури. Показано, що коефіцієнти випромінювання нагрітих тіл залежать від геометричної форми та орієнтації випромінювальної поверхні, її хімічний склад, фізичний стан, наявність забруднень на поверхні і т. д. При цьому важливо знати фізичний та хімічний стан поверхні в умовах проведення вимірювання, оскільки стан і властивості поверхні змінюється зі зміною температури, що, як правило, супроводжується зміною випромінювальної здатності.

Залежність коефіцієнта випромінювання об'єкта від його температури, що властива деяким речовинам, призводить до того, що повна потужність теплового випромінювання об'єкта залежить від його температури складним чином, що ускладнює безконтактні вимірювання. Певні труднощі викликає різноманіття в ІЧ діапазоні випромінювальних властивостей речовин, що різко відрізняються властивостями один від одного: гази і метали, кераміка і пластика, пил і композиційні матеріали.

В [4, 5] представлені в інфрачервоному діапазоні залежності випромінювальних здатностей ряду речовин від температури та довжини хвилі. Показано, що коефіцієнт випромінювальної здатності більшості металів (діелектриків) збільшу-

ється (зменшується) при нагріванні.

Схожі обставини відмічено в роботах [6 – 8], які відображають основні тенденції сучасної термометрії за випромінюванням і робиться висновок про велику кількість способів визначення коефіцієнту випромінювання або безпосередньо, вимірюючи випромінювання тіла в порівнянні з випромінюванням чорного тіла при однаковій температурі, або опосередковано, вимірюючи коефіцієнти відображення цих тіл. У всіх випадках необхідно враховувати паразитні фактори.

Альтернативний варіант вирішення проблеми представлено в [9], де пропонується вимірювання температури з використанням оптичних приладів та контактних термометрів. Змінюючи значення випромінювальної здатності, домагаються рівності показань між тепловізором та термопарою.

Слід зауважити, що в роботах відмічається велика кількість способів визначення коефіцієнту випромінювальної здатності та які фактори впливають на це, проте в жодній не представлені дослідження впливу кута спостереження на випромінювальну здатність, що сприймається приладами ІЧ-техніки.

Таким чином, результати проведеного аналізу дають змогу зробити висновок, що можливість підвищення точності вимірювання температури шляхом визначення впливу кута спостереження на коефіцієнт випромінювальної здатності, що сприймається приладами ІЧ-техніки являється найменш досліджуваним фактором. Тому виникає необхідність в більш детальному його розгляді.

Об'єкт, мета та задачі дослідження

Об'єктом даного дослідження є тепловий контроль приладами інфрачервоної техніки.

Метою роботи є зниження методичної похибки безконтактного методу вимірювання температури на основі дослідження впливу кута спостереження на коефіцієнт випромінювальної здатності.

Для поставленої мети в роботі необхідно вирішити наступні задачі:

1. Дослідити особливості вимірювання температури за випромінюванням.
2. Проаналізувати проблеми, що пов'язані з випромінювальною здатністю матеріалів.
3. Провести експериментальні дослідження, що підтверджують вплив кута спостереження на коефіцієнт випромінювальної здатності.

Виклад основного матеріалу

Безконтактний метод вимірювання температури знаходить все більш широке застосування у всіх галузях промисловості, проте до теперішнього часу носить допоміжний характер. Безконтактний тепловий метод є одним із напрямлень

методу неруйнівного контролю і оснований на вимірюванні температури поверхні об'єкта за допомогою приладів інфрачервоної техніки.

Даний метод широко розповсюджений у зв'язку з рядом переваг перед традиційним методами. По-перше, це висока швидкодія, що визначається типом приймача випромінювання, по-друге, можливість контролю об'єкта без застосування контактних методів вимірювання, по-третє, можливість документування та формування інформаційного звіту, по-четверте, використання в автоматичних системах управління в якості ланки зворотного зв'язку.

Суттєвим недоліком безконтактних оптичних методів вимірювання температури є відсутність даних стосовно випромінювальної здатності реальних матеріалів в умовах експерименту [10]. Це пов'язано з тим, що здатність об'єкта виділяти інфрачервоне випромінювання може змінюватися, оскільки, залежить від матеріалу, властивостей поверхні, напрямку спостереження, а також у випадку з деякими матеріалами – від температури.

Для виявлення особливостей зміни коефіцієнту випромінювання з точки зору теплового контролю проводився технологічний аудит, метою якого було визначення впливу кута спостереження на коефіцієнт випромінювальної здатності, що в свою чергу призводить до неточного вимірювання температури.

Дослідження проводилось на базі тепловізора Fluke Ti9 з використанням допоміжного обладнання – штатив, угломір, персональний комп'ютер.

Схема процесу вимірювання представлена на рис. 1.

Основним направленням даної схеми є розрахунок температури з урахуванням впливу кута спостереження на коефіцієнт випромінювальної здатності. Це дозволить в практичних умовах підвищити точність визначення температури досліджуваного об'єкту.

Залежність від кута спостереження має різний вид для металів та діелектриків. Якщо для діелектриків в області нормалі до поверхні вона приблизно підкоряється закону Ламберта і має найбільше значення при вимірюванні по нормалі, то вимірювання температури поверхні більшості металів найбільш ефективно проводити під кутом 20 – 30°, де коефіцієнт випромінювання максимальний. За межами даних значень, коефіцієнт випромінювання швидко зменшується до нуля при направленні спостереження по дотичній [8].

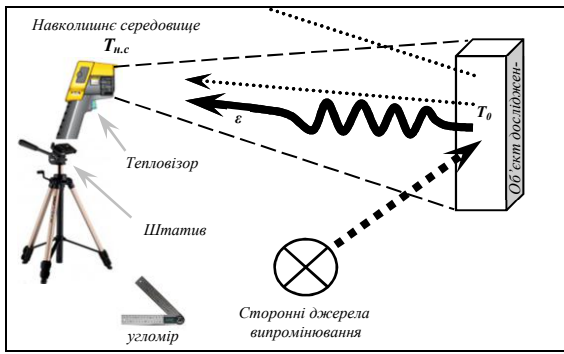


Рисунок 1 – Схема процесу вимірювання температури з відомим кутом спостереження

Внаслідок залежності коефіцієнту випромінювання від кута спостереження, ефективний коефіцієнт неплоских поверхонь різний в різних точках, хоча матеріал один і той же, коефіцієнт якого по нормалі – величина постійна.

Фактичне значення коефіцієнту випромінювальної здатності може бути розраховано за формулою:

$$\epsilon_{\text{факт}} = \frac{\epsilon_{\text{вим}}}{K_{\text{кут}}}, \quad (1)$$

де $\epsilon_{\text{факт}}$ – фактичне значення коефіцієнту випромінювальної здатності;

$\epsilon_{\text{вим}}$ – вимірюване значення коефіцієнту випромінювальної здатності;

$K_{\text{кут}}$ – коефіцієнт впливу кута спостереження.

Результати досліджень

При проведенні експерименту були отримані залежності коефіцієнту $K_{\text{кут}}$ від кута спостереження.

Для металів така залежність має вигляд:

$$K_{\text{кут}} = \begin{cases} 0.0164\varphi^2 - 0.1067\varphi + 1.1464, & 0 \leq \varphi \leq 85, \\ -2,53\varphi + 5.06, & 85 \leq \varphi \leq 90, \end{cases} \quad (2)$$

де φ – кут спостереження.

Для діелектриків залежність $K_{\text{кут}}$ від кута спостереження найбільш точно описується формулою:

$$K_{\text{кут}} = -0,0014 \cdot \varphi^3 + 0,022 \cdot \varphi^2 - 0,1 \cdot \varphi + 1,1. \quad (3)$$

За допомогою приладів інфрачервоної техніки досліджено вплив кута спостереження на точність вимірювання температури деталі зі сталі (рис. 2) та композиційного матеріалу (рис. 3). Визначення температури проводилося безпосе-

редньо на реальному об'єкті, формуючи вибірку даних:

- дійсної температури, виміряної контактним термометром;
- температури, що вимірювалася за допомогою тепловізора під різними кутами спостереження;
- визначення температури з урахуванням кута спостереження.

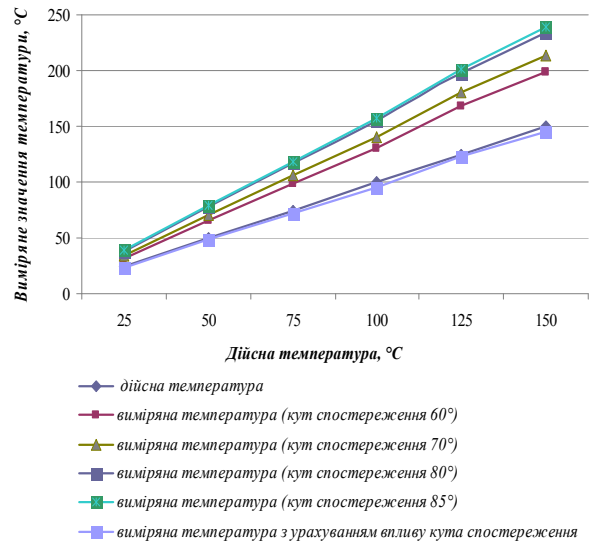


Рисунок 2 – Вплив кута спостереження на точність вимірювання температури сталі

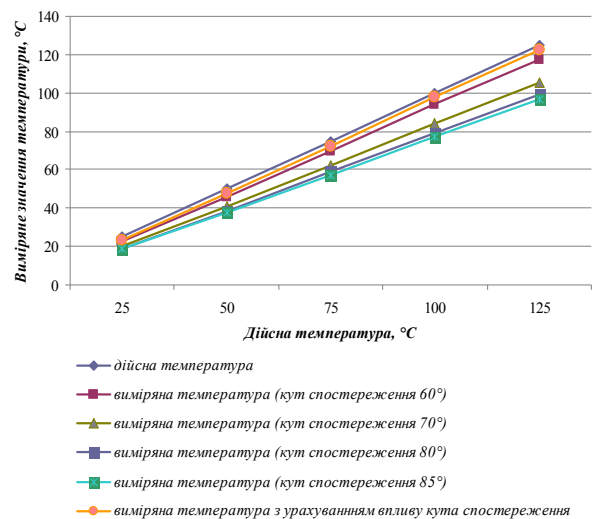


Рисунок 3 – Вплив кута спостереження на точність вимірювання температури композиційного полімера

Аналіз отриманих результатів впливу кута спостереження на точність вимірювання температури, що представлені в виді графіків, дають змогу зробити висновок, що зі збільшенням кута спостереження похибка вимірювання збільшується. Відносна похибка вимірювання темпера-

тури деталі зі сталі при куті спостереження 85° складає 57%, а для деталі з композиційного матеріалу – 22%. Таким чином, можна вважати, що таке істотне значення похибки робить вимірювання безглуздими. У той же час, вплив кута спостереження на точність вимірювання дає можливість звести значення абсолютної похибки вимірювання температури за допомогою приладів інфрачервоної техніки до декількох градусів, що у відносній формі не перевищує 1%.

Висновки

1. Досліджено, що вимірювання температури за випромінюванням є одним із основних напрямлень розвитку високоефективної системи діагностики, яка забезпечує можливість контролю теплового стану об'єкта, виявлення дефектів на ранній стадії їх розвитку, а також мінімізація затрат на технічне обслуговування.

2. Виявлено, що одним із істотних факторів, що впливають на точність вимірювання температури, є зміна коефіцієнту випромінювання об'єкта, що має істотну кривизну поверхні та неможливість його визначення в важкодоступних місцях. В загальному випадку коефіцієнт випромінювання залежить від виду матеріалу, довжини хвилі, температури, стану поверхні та кута спостереження поверхні об'єкта. Значення коефіцієнта випромінювання в основному приведені в таблицях або представлені в виді графіків, і мають досить значну різницю, що не дає змогу проводити точні вимірювання температури об'єкта.

3. Встановлено, що помилки у встановленні коефіцієнта випромінювальної здатності істотно впливають на точність вимірювання температури за допомогою приладів інфрачервоної техніки. Проведені дослідження впливу кута спостереження на точність вимірювання температури виробу зі сталі і композиційного полімеру показують, що при зміні кута спостереження, похибки вимірювання температури тепловізором можуть перевищувати 50%, що робить вимірювання безглуздими. Запропоновано залежності, що дозволяють звести значення абсолютної похибки вимірювання температури за допомогою приладів інфрачервоної техніки до декількох градусів, що у відносній формі не перевищує 1%.

4. Результати дослідження дозволяють підвищити точність вимірювання температури шляхом урахування впливу кута спостереження на коефіцієнт випромінювальної здатності об'єкта, нормалізувати зображення термограм для різних ділянок об'єкта, а також, виділення можливих

дефектних зон на термограмі для визначення рівномірності розподілу теплового поля.

Список використаних джерел

1. Свет Д. Я. Объективные методы высокотемпературной пирометрии при непрерывном спектре измерения [Текст] / Д. Я. Свет. – М.: Наука, 1968. – 236 с.
2. Оборський Г. О. Вимірювання неелектричних величин [Текст]: підручник / Г. О. Оборський, П. Т. Слободяник. – К.: Наука і техніка, 2005. – 200 с.
3. Брамсон М. А. Инфракрасное излучение нагретых тел [Текст]. Т. 1. / М. А. Брамсон. – М.: Наука, 1965. – 224 с.
4. Valancius K. Transient heat conduction process in the multilayer wall under the influence of solar radiation [Text]: Proceedings / K. Valancius, A. Skrinska // Improving human potential program. – Almeria, Spain: PSA, 2002. – P. 179–185.
5. Minkina, W. Pomiarы termovizyne-przyrzdy i metody [Text] / W. Minkina. – Czestochowa: Wydwa Politechniki Czestochowskiej, 2004. – 243 p.
6. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль [Текст] / В. П. Вавилов. – М.: ИД Спектр, 2009. – 544 с.
7. Гордов, А. Н. Основы пирометрии [Текст] / А. Н. Гордов. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Металлургия, 1971. – 448 с.
8. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение [Текст]: пер. с франц. / Ж. Госсорг. – М.: Мир, 1988. – 416 с.
9. Fam S. S. Ultrasonics thermometry [Text] / S. S. Fam, L. C. Lynnworth, E. H. Carnevale // Instrument and Control System. – 1969. – Vol. 42, № 10. – P. 107 – 110.
10. Оборський, Г. О. Дослідження впливу випромінювальної здатності матеріалів на точність тепловізійного методу контролю [Текст] / Г. О. Оборський, О. С. Левинський, М. О. Голофєєва // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – №2/3(28). – С. 4 – 7.

Надійшла до редакції 13.03.2017

Рецензент: д.т.н., доц. Боряк К. Ф., Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса.

А. С. Левинский, М. А. Голофеева, к.т.н., В. О. Шворинь, С. М. Урсол

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЪЕКТА ПРИБОРАМИ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕХНИКИ

Рассмотрены вопросы измерения температуры с помощью приборов инфракрасной техники. В край актуальным вопросом является дистанционное измерение действительного значения температуры при неизвестной излучательной способности исследуемого тела. Проведен анализ факторов, влияющих на точность измерения температуры. Представлено исследование влияния угла наблюдения на коэффициент излучающей способности.

Ключевые слова: температура, коэффициент излучательной способности, погрешность измерения, тепловизионный контроль, инфракрасная техника.

A. Levinskiy, M. Holofieva, PhD, V. Shvorin, S. Ursol

EXPERIMENTAL STUDY OF THE OBJECT TEMPERATURE USING INFRARED DEVICES

Temperature measurement issues using infrared devices are considered. The topical issue is the remote measurement of the actual temperature values of the tested body when its emissivity is unknown. The analysis of factors influencing the accuracy of the temperature measurement is given. The study of the angle of observation influence on the emissivity coefficients is presented.

Keywords: temperature, emissivity, measurement error, thermal control, infrared technology.

УДК 621.787:539.4

В. С. Кравчук¹, к.т.н., А. Ф. Дашенко¹, д.т.н., Л. В. Коломиец², д.т.н., А. М. Лимаренко¹, к.т.н.

¹Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса

²Одесская государственная академия технического регулирования и качества, г. Одесса

ОБ ОЦЕНКЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Рассмотрены особенности оценки циклической прочности деталей машин. Показана необходимость применения вероятностных методов, опирающихся на эксперименты в статистической постановке. Предложены расчетные зависимости для оценки среднего квадратического отклонения пределов выносливости поверхностно упрочненных деталей машин. Показано, что упрочнение поверхностным пластическим деформированием снижает рассеяние сопротивления усталости.

Ключевые слова: циклическая прочность, детали машин, поверхностное упрочнение, вероятностные методы расчетов.

Введение

Для деталей, работающих в эксплуатации при повторно-переменных напряжениях, особое значение имеет предотвращение усталостного разрушения с его стремлением экономно расходовать материал на деталь. Однако добиться этого нелегко, так как при решении задач прочности основную роль играют конструктивно-технологические факторы, теоретический учет которых сложен. В ответственных случаях для их оценки проводят специальные дорогостоящие эксперименты, которые трудоемки и требуют огромных временных затрат. Для деталей и элементов

конструкций подобные испытания проводить не всегда возможно и целесообразно. Поэтому особое значение имеют практические расчеты по критерию сопротивления усталости в соответствии с детерминированными подходами, которые проводят, назначая коэффициенты запаса прочности, исходя из условий работы конструкции, и на этой основе определяют максимальное расчетное напряжение, возникающее в опасном сечении детали [1],

$$\sigma_{\text{рас}} \leq \sigma_{-1Д}/n, \quad (1)$$